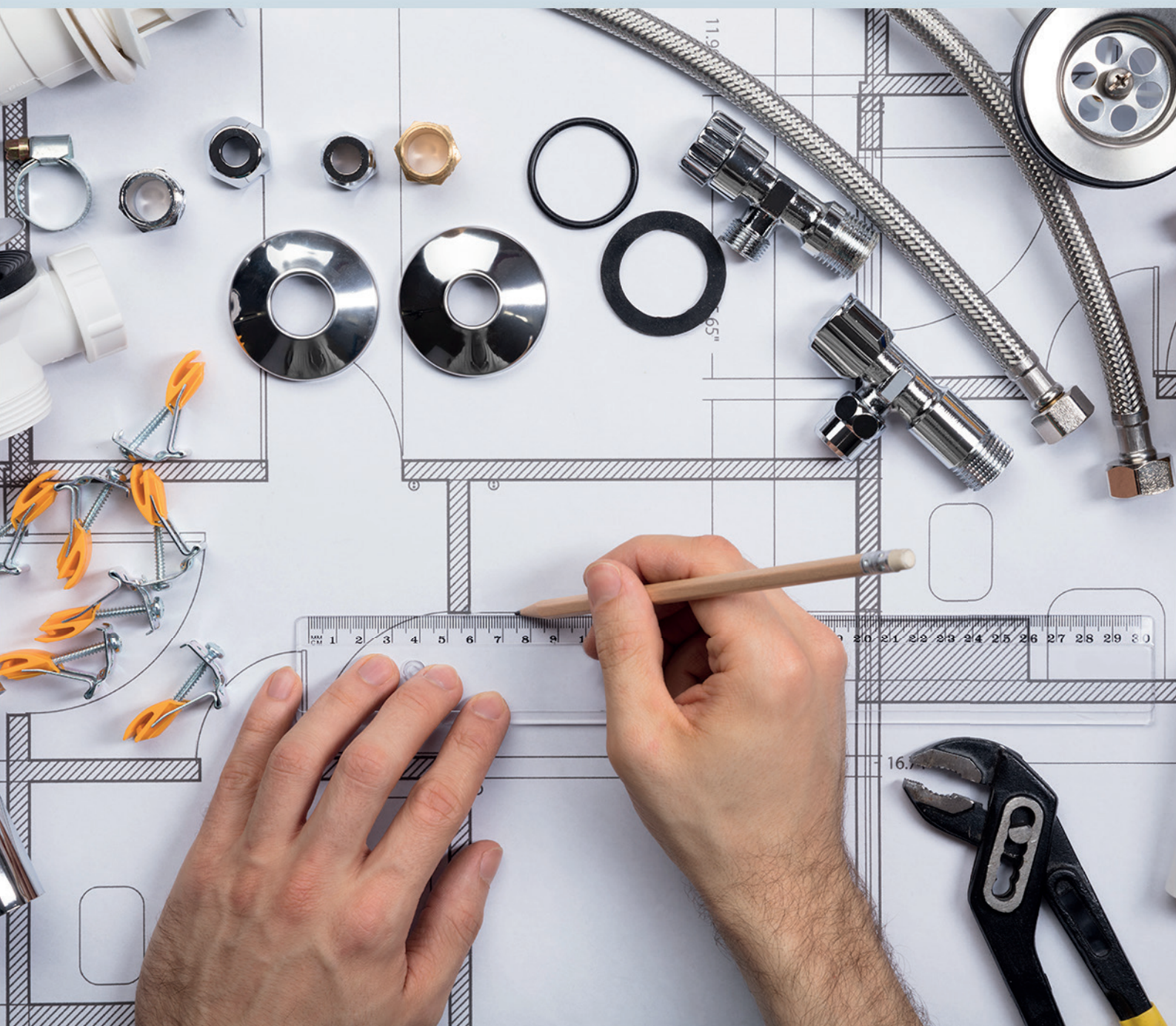


Ciência e Engenharia de Materiais

2

Marcia Regina Werner Schneider Abdala
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA

(Organizadora)

Ciência e Engenharia de Materiais

2

Atena Editora

2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 2 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-63-5

DOI 10.22533/at.ed.635183010

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE VANÁDIO NA MOAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 52100, PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ	
<i>Leandra Fernandes de Oliveira</i>	
<i>Bruna Horta Bastos Kuffner</i>	
<i>Daniela Sachs</i>	
<i>Gilbert Silva</i>	
<i>Geovani Rodrigues</i>	
CAPÍTULO 2	12
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM INNERSHIELD NAS CARACTERÍSTICAS DA SOLDA DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM – A36	
<i>Waldemir dos Passos Martins</i>	
<i>Paulo Victor Cunha Caetano</i>	
<i>Valdemar Silva Leal</i>	
<i>Valter Alves de Meneses</i>	
CAPÍTULO 3	25
CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO AÇO INOXIDÁVEL 17-4 PH NITRETADO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	
<i>Ane Caroline Celestino Silva</i>	
<i>Lucas da Silva Vicente</i>	
<i>Christian Egídio da Silva</i>	
<i>Cristina de Carvalho Ares Elisei</i>	
<i>Cirlene Fourquet Bandeira</i>	
<i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
CAPÍTULO 4	32
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BAIXO CARBONO APÓS PROCESSO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	
<i>Vanessa Moura de Souza</i>	
<i>Vinicius Martins</i>	
CAPÍTULO 5	43
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS MATRIZES METÁLICAS DO SISTEMA FE-CU-NB OBTIDAS POR Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Marcello Filgueira</i>	
CAPÍTULO 6	58
ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA 356.0	
<i>Laura Ferrazza Kirch</i>	
<i>Amanda Yuki Shimosaka</i>	
<i>Dalmarino Setti</i>	
CAPÍTULO 7	65
ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DAS MATRIZES METÁLICAS DE FE-CU-25%NB E FE-CU-25%CO DURANTE A Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Adriano Corrêa Batista</i>	
<i>Luis Guerra Rosa</i>	
<i>Paulo Santos Assis</i>	

CAPÍTULO 8	84
TRANSIÇÃO OBSERVADA ENTRE OS MODOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR “RISCAMENTO” E POR “ROLAMENTO” EM WC-CO P20 E AÇO-FERRAMENTA M2	
<i>Ronaldo Câmara Cozza</i>	
CAPÍTULO 9	92
ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DO AÇO ABNT 1045 APÓS TÊMPERA E REVENIMENTO	
<i>João Paulo Montalván Shica</i>	
<i>Matheus Henryque Almeida e Silva</i>	
CAPÍTULO 10	105
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PLACAS DE ALUMÍNIO	
<i>Pietro Olegário da Silva</i>	
<i>Adriana Amaro Diacenco</i>	
CAPÍTULO 11	118
ANÁLISE DA MICRODUREZA E CORROSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW NA CHAPA DE AÇO DOBRADA TIPO U	
<i>Josemairon Prado Pereira</i>	
<i>Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves</i>	
CAPÍTULO 12	129
ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Thyálita Coêlho Moreira Mousinho</i>	
<i>Thaís Spíndola Garcêz</i>	
<i>José Francisco dos Reis Sobrinho</i>	
<i>Nelson Guedes de Alcântara</i>	
CAPÍTULO 13	138
MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO ND:YAG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L	
<i>Dair Ferreira Salgado Junior</i>	
<i>Vicente Afonso Ventrella</i>	
<i>Juno Gallego</i>	
CAPÍTULO 14	153
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LÂMINAS DE SERRA NO CORTE DA MADEIRA COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
<i>Daniel Villas Bôas</i>	
<i>Elder Jesus Lima Machado</i>	
<i>Vanessa Ferreira Neves</i>	
CAPÍTULO 15	160
O EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE HOMOGENEIZAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO EM DEFORMAÇÃO A FRIO DAS LIGAS TI-35NB E TI-35NB-0,15SI	
<i>Késia Filadélfia Dionizio Silva Ramos</i>	
<i>Helton José Rodrigues Cabral</i>	
<i>Reinan Tiago Fernandes dos Santos</i>	
<i>Wilton Walter Batista</i>	
CAPÍTULO 16	173
LIGA DE MAGNÉSIO AZ91D: AVALIAÇÃO DA BIODEGRABILIDADE E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	
<i>Ronaldo Veronês Nascimento</i>	
<i>Ângela Beatriz Coelho Arnt</i>	
<i>Marcio Roberto da Rocha</i>	
<i>Steferson Luiz Stares</i>	

CAPÍTULO 17	184
INFLUÊNCIA DO PH E DO TEMPO DE IMERSÃO NA SILANIZAÇÃO JUNTO DE TANINOS PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇOS GALVANIZADOS	
<i>Bruno Pienis Garcia</i> <i>Álvaro Meneguzzi</i>	
CAPÍTULO 18	194
A NEW PROCEDURE TO DETERMINE THE PERMITTIVITY OF RADAR ABSORBING MATERIALS	
<i>Tamara Indrusiak Silva</i> <i>Iaci Miranda Pereira</i> <i>Jorge A. Mitrione Souza</i> <i>Marbey Manhães Mosso</i> <i>Ângelo M. Leite Denadai</i> <i>Jéferson Gomes da Silva</i> <i>Alan Reis de Oliveira</i> <i>Bluma Guenther Soares</i>	
CAPÍTULO 19	204
DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO A BASE DE NIÓBIO PARA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO DE AÇO-CARBONO (SAE 1020)	
<i>Paloma Detlinger</i> <i>Brian Utri</i> <i>Guilherme Arielo Rodrigues Maia</i> <i>Rodrigo Helleis</i> <i>Cynthia Beatriz Fürstenberger</i> <i>Everson do Prado Banczek</i>	
CAPÍTULO 20	213
CORROSÃO E BIOCORROSÃO EM AÇO CARBONO	
<i>Diana Magalhães Frazão</i> <i>Ivanilda Ramos de Melo</i> <i>Severino Leopoldino Urtiga Filho</i>	
SOBRE A ORGANIZADORA	218

ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM

Thyálita Coêlho Moreira Mousinho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Teresina – Piauí

Thaís Spíndola Garcêz

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Teresina – Piauí

José Francisco dos Reis Sobrinho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Teresina – Piauí

Nelson Guedes de Alcântara

Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR
São Carlos – São Paulo

RESUMO: Um dos mais sérios defeitos relativos à soldabilidade de aços de alta resistência é a ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que podem ocorrer tanto no Metal de Solda - MS quanto na Zona Afetada Termicamente - ZAT da junta soldada, à temperaturas abaixo de 200 °C. O controle do ciclo térmico durante a soldagem é importante para a obtenção de uma junta soldada isenta desse tipo de defeito. Os ciclos térmicos em juntas soldadas podem ser avaliados por métodos diretos, realizando medidas feitas diretamente na junta soldada ou

aplicando equações disponíveis na literatura, que foram obtidas empiricamente ou por regressão linear múltipla. O presente trabalho utiliza duas metodologias para a avaliação da susceptibilidade à formação de trincas a frio, o método direto, realizando medições, e o método da aplicação das equações de soldagem. Em seguida, uma análise comparativa dos dois métodos.

PALAVRAS-CHAVE: Aços de alta resistência, Método direto, Equações de soldagem.

ABSTRACT: One of the most serious defects on the weldability of high strength steels is the occurrence of cracks induced by hydrogen or cracks cold, which may occur in the weld metal - MS as in area affected Thermally - HAZ of the welded joint, at temperatures below 200 ° C. Control of the thermal cycle during welding it is important to obtain a welded joint free of this type of defect. The thermal cycles in welded joints can be assessed by simulation methods, with measures made directly to the welded joint or applying some equations available in the literature, which were obtained empirically or by multiple linear regression. This study utilizes two methods for assessing the susceptibility to the formation of cold cracks, the direct method by conducting measurement, and the method of application of welding equations. Then, comparative analysis of two methods.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, os processos de soldagem constituem técnicas fundamentais na fabricação e manutenção de estruturas e equipamentos em escala industrial. As melhorias no controle e portabilidade do maquinário de execução agregaram rapidez e flexibilidade na união de peças por soldagem, representando economia e produtividade e consolidando este processo globalmente em diversos segmentos industriais.

Com o avanço tecnológico das últimas décadas houve a necessidade da fabricação de estruturas com alta resistência e diminuição do peso. As chapas feitas com aços avançados de alta resistência, por exemplo, são uma das principais respostas da siderurgia aos desafios impostos por seus clientes em sua busca por uma maior competitividade e atendimento às restrições ao consumo de energia e aos danos ao meio ambiente.

Um dos mais sérios defeitos relativos à soldabilidade de aços de alta resistência é a ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que representam um dos maiores problemas na soldagem de aços de alta resistência. Estas trincas a frio podem ocorrer tanto no Metal de Solda - MS quanto na Zona Afetada Termicamente - ZAT da junta soldada, a temperaturas abaixo de 200°C, com faixa crítica de ocorrência em torno da temperatura ambiente. A ocorrência de trinca a frio também pode ser causada pela interação dos seguintes fatores: níveis de tensão, susceptibilidade da microestrutura, teor de hidrogênio difusível e a temperatura. E, todos esses fatores são influenciados pela taxa de resfriamento que ocorre na junta soldada. Manter o controle do ciclo térmico é essencial para a obtenção de uma junta soldada livre desse tipo de defeito.

Existem diferentes métodos para a avaliação da soldabilidade de aços de alta resistência e avaliação da susceptibilidade à formação de trincas a frio, neste trabalho utilizamos o método experimental e o método de aplicação das equações de soldagem, avaliando os resultados obtidos em cada método e fazendo uma análise comparativa entre eles.

A tecnologia da soldagem se caracteriza por um grande número de variáveis e parâmetros operacionais inter-relacionados de maneira quase sempre complexa, o que torna difícil o desenvolvimento de modelos matemáticos teóricos ou empíricos para processos ou produtos⁽¹⁾. Muitas tentativas de modelamento têm sido feitas, mas com êxito limitado. Pode se encontrar na literatura um número bastante elevado de equações e ábacos bastante úteis na solução de problemas complexos ou mesmo no trabalho rotineiro dos profissionais da área de soldagem, que minimizam a necessidade de testes e ensaios, com economia de tempo e materiais⁽¹⁾. Neste trabalho foi realizado o levantamento e a aplicação de algumas equações aplicáveis na avaliação

da velocidade de resfriamento e do tempo de resfriamento em amostras variando sua tensão, corrente e espessura da chapa e a temperatura de pré-aquecimento, avaliando sua confiabilidade e viabilidade na aplicação prática. E a comparação dos resultados obtidos através desse método com os resultados obtidos experimentalmente junta soldada pelo processo MAG em um aço de alta resistência.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção dos resultados experimentais, segundo o trabalho de Reis Sobrinho e Alcântara ⁽²⁾, o processo de soldagem utilizado foi SAMG com energias de soldagem de 0,8 kJ/cm² e 1,3 kJ/cm² obtidas conforme tabela I, um sistema de análise térmica constituído de termopar, interface analógico/digital e um microcomputador, chapas de aço ASTM 514 com composição química e propriedades mecânicas ligeiramente variadas, nas espessuras de 0,83 e 1,6 mm.

Parâmetros de Soldagem					
H (J/cm)	e (cm)	T (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
8645	0,83	30	19,0 ± 0,7	182 ± 2,0	4,0
		100			
	1,6	30			
		100			
12187,5	0,83	30	26,0 ± 2,0	187,5 ± 12,0	4,0
		100			
	1,6	30			
		100			

Tabela I. Parâmetros de Soldagem

As equações utilizadas para a obtenção dos resultados referentes ao segundo método foram retiradas de um trabalho que faz um levantamento de todas as equações disponíveis na literatura⁽¹⁾, sendo algumas destas utilizadas neste trabalho:

$$H = \frac{(V \cdot I)}{v} \quad (A)$$

Onde H é a energia de soldagem, em J/cm; V é a tensão de soldagem, em V; I é a corrente de soldagem, em A.

$$H_L = H \cdot \eta \quad (B)$$

Onde H_L é a energia líquida de soldagem, em J/cm; H é a energia de soldagem, em J/cm, e η é um fator adimensional de rendimento, que depende do processo, dos parâmetros de soldagem e de diversos outros aspectos, incluindo as propriedades

físicas dos materiais e a geometria das peças ⁽³⁾. A Tabela II apresenta alguns valores para rendimento térmico.

Processo	η
Eletrodo Revestido	0,65 – 0,85
GMAW	0,65 – 0,85
GTAW (CC+)	0,50 – 0,80
GTAW (CA)	0,20 – 0,50
SAW	0,80 – 0,99
Oxi-gás	0,25 – 0,80

Tabela II. Valores típicos para η ⁽⁴⁾

De modo geral, η varia com diversos parâmetros operacionais. Infelizmente, essas influências são difíceis de serem consideradas usualmente. Adicionalmente, os efeitos térmicos de um processo de soldagem também dependem das características do metal de base, da junta e da própria fonte de calor (densidade de energia). Assim, H ou H_L devem ser utilizados com cautela na comparação de processos de soldagem ou na avaliação de seus efeitos, uma vez que os valores reais podem ser significativamente diferentes dos valores estimados em uma dada situação, levando a erro nas previsões das consequências da soldagem na estrutura e/ou propriedades do material ⁽¹⁾. No presente trabalho utilizamos o valor intermediário de 0,75 para η , referente ao valor mediano para um processo GMAW, segundo a Tabela II.

A velocidade de resfriamento (R) da junta soldada a uma dada temperatura ou o tempo de resfriamento (Δt) entre duas temperaturas, geralmente 800 e 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) para aços, são características importantes do ciclo térmico de soldagem, pois influenciam fortemente a microestrutura, e podem ser estimados por:

$$R_g = \frac{2\pi k(T-T_0)^2}{H_L} \quad (C)$$

$$R_f = 2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_L}\right)^2 (T-T_0)^3 \quad (D)$$

$$(\Delta t_{8/5})_f = \frac{(H_L)^2}{2\pi k\rho C h^2} \left(\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right) \quad (E)$$

Onde k é a condutividade térmica do material, em $J/(cm \cdot s \cdot ^\circ C)$, T e T_0 são, respectivamente, a temperatura ($^\circ C$) na qual se quer estimar a velocidade de resfriamento e a temperatura inicial da chapa, ρ é a densidade do material, em g/cm^3 ; C é o calor específico do material, em $J/(g \cdot ^\circ C)$ e h é a espessura da peça, em mm. O subscrito “f” se aplica à soldagem de chapas “finas”, isto é, com passe de penetração total e fonte de calor linear, fluxo de calor bidimensional ^(5,6). As equações

(C) e (D) foram obtidas estritamente para o eixo central da solda, embora, segundo o trabalho do prof. Sérgio do Carvalho Perdigão⁽⁷⁾, possam ser consideradas, para aços estruturais, em regiões da solda em que a temperatura de pico do ciclo térmico é superior a 1000°C.

A Tabela III mostra valores típicos de k , ρ e C para um aço carbono e esses valores foram os utilizados na aplicação das equações de soldagem.

Material	k (J/cm.s.°C)	ρ (g/cm ³)	C (J/(g °C))
Aço Carbono	0,54	7,83	0,46

Tabela III. Valores típicos para k , ρ , C

A espessura crítica, que distingue entre as condições de resfriamento de “chapa fina” e chapa grossa, pode ser estimada, para a velocidade de resfriamento, por⁽³⁾:

$$h_c = \sqrt{\frac{H_L}{\rho C (T - T_0)}} \quad (F)$$

Para o tempo de resfriamento, a espessura crítica é dada por(9):

$$(h_c)_{T_1/T_2} = \sqrt{\frac{H_L}{2\rho C} \left(\frac{1}{T_2 - T_0} + \frac{1}{T_1 - T_0} \right)} \quad (G)$$

A American Welding Society, AWS⁽³⁾ recomenda que a equação para velocidade de resfriamento em chapa fina, equação (D), seja aplicada para $h/h_c < 0,6$ e a equação para chapa grossa, equação (C), com $h/h_c > 0,9$. Para valores de h/h_c entre 0,6 e 0,9, a AWS recomenda considerar que a velocidade de resfriamento tenha um valor intermediário entre obtidos pelas equações dos dois regimes de escoamento de calor. Para o tempo de resfriamento entre 800 e 500°C, a equação (E) é aplicável para valores $h/(h_c)_{T_1/T_2} < 1$ ⁽⁸⁾.

Outra temperatura importante é a temperatura máxima (temperatura de pico) atingida em um ponto da junta durante a deposição de um cordão de solda, que pode ser útil, por exemplo, para estimar a extensão da zona termicamente afetada (ZTA). Para a condição de resfriamento de chapa fina (f), essa temperatura pode ser calculada por ⁽⁹⁾:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{0,0413 \rho C h y}{H_L} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (H)$$

Onde T_p é a temperatura máxima ou de pico, em °C, que se deseja estimar; y é a distância da região de interesse à linha de fusão, em mm. Nos resultamos

experimentais a linha de fusão teve uma espessura de 0,038 cm, sendo 0,019 cm o centro da linha de fusão. Para a medida “y” foi utilizado 0,05 cm até o centro da linha de fusão, resultando em 0,069 cm; T_f é a temperatura de fusão do material, em °C, que corresponde a 1410 °C. E os demais termos têm os mesmos significado e unidades já descritos.

Para todos os resultados utilizamos arredondamento em duas casas decimais.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Velocidade de Resfriamento (°C/s)

Esse parâmetro é importante na determinação da microestrutura dos aços estruturais comuns, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento.

Para a escolha da equação adequada para calcular a velocidade de resfriamento, é necessário calcular a razão entre a espessura da chapa (h) e a sua espessura crítica (h_c), de modo que (h_c) seja definida pela equação (F). Após a classificação, foi utilizada a equação (C) para as chapas grossa e (D) para chapas fina.

HI	To	H	Hc	h/hc	Classificação	Velocidade de resfriamento(°C/s)
6483,75	30	0,83	1,60	0,52	CHAPA FINA	68,69
		1,6	1,60	1	CHAPA GROSSA	256,42
	100	0,83	1,69	0,49	CHAPA FINA	50,07
		1,6	1,69	0,95	CHAPA GROSSA	207,70
9140,63	30	0,83	1,90	0,44	CHAPA FINA	34,56
		1,6	1,90	0,84	-	155,16
	100	0,83	2,01	0,41	CHAPA FINA	25,20
		1,6	2,01	0,80	-	120,48

Tabela IV. Classificação da chapa e velocidade de resfriamento

Não foi possível classificar como chapa fina ou grossa a junta soldada com $HI=9140,63$ e espessura $h=1,6$ cm, pois a razão entre a espessura e a espessura crítica igual a $h/h_c=0,69$ encontra-se fora do intervalo de classificação. A literatura sugere, para esse caso, calcular a velocidade considerando como chapa fina e como chapa grossa, e utilizar a velocidade média calculada para os dois casos.

Segundo Reis Sobrinho⁽²⁾, a susceptibilidade a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio é diretamente proporcional à velocidade de resfriamento, pois durante o

resfriamento há a formação de uma microestrutura ferrítica com regiões de martensita, ou uma bainita grosseira. Porém, se o resfriamento for lento, afetará adversamente a resistência e a tenacidade da região. A junta soldada à $HI=6483,75$, $To=100^{\circ}C$, $h=1,6$ cm e classificada como chapa grossa, foi a amostra que apresentou maior velocidade de resfriamento.

3.2 Tempo de resfriamento (s)

Outra equação é utilizada para a classificação da chapa, quanto a sua espessura, para a escolha da equação adequada para calcular o tempo de resfriamento. A equação (G) aplicada variando a energia líquida de soldagem e a temperatura de aquecimento, mostrou que todas as amostras foram classificadas como chapa fina, pois a razão entre a espessura e a espessura crítica foi menor que 1 para todos os casos.

H	HI	To	h	hc	h/hc	Classificação
8645	6483,75	30	0,83	1,62	0,51	CHAPA FINA
			1,6	1,62	0,98	CHAPA FINA
		100	0,83	1,74	0,48	CHAPA FINA
			1,6	1,74	0,92	CHAPA FINA
12187,5	9140,63	30	0,83	1,92	0,52	CHAPA FINA
			1,6	1,92	0,83	CHAPA FINA
		100	0,83	2,06	0,40	CHAPA FINA
			1,6	2,06	0,78	CHAPA FINA

Tabela V. Classificação da chapa para tempo de resfriamento

Após a classificação da chapa e aplicada a equação (E) para obtenção do tempo de resfriamento, foram encontrados os seguintes resultados:

Tempo de resfriamento calculado($^{\circ}C/s$)	Tempo de resfriamento medido($^{\circ}C/s$)
14,18	9,8
3,82	2,57
21,02	16,1
5,65	4,8
28,19	13,3
7,59	3,91
41,77	22,1
11,24	9

Tabela VI. Tempo de resfriamento calculado e medido

Numa análise comparativa entre os resultados de tempo de resfriamento obtidos experimentalmente, fazendo medições diretas utilizando o termopar, e os resultados obtidos aplicando a equação para tempo de resfriamento de chapas finas (D), verifica-

se a presença de aproximações e, em alguns casos, discordâncias mais consideráveis.

3.3 Temperatura de pico

A temperatura de pico é a variável que define os efeitos metalúrgicos provocados na junta soldada, principalmente no que diz respeito à granulometria.

Para o cálculo da temperatura de pico, foi utilizada a equação (H), variando a temperatura de pré-aquecimento e a energia líquida de soldagem.

HI(J/cm)	h(cm)	To(°C)	Tp (°C)
6483,75	0,83	30	1407,50
		100	1407,75
	1,6	30	1405,19
		100	1405,67
9140,63	0,83	30	1408,23
		100	1408,40
	1,6	30	1406,92
		100	1406,59

Tabela VII. Temperatura de pico

Os valores de temperatura de pico obtidos aplicando a equação (H) variaram de 1405,19 a 1408,40 °C valores aproximados ao encontrado utilizando medição direta durante a soldagem, que foi de 1485 °C. Apesar da pequena diferença entre os resultados, isso não afetará na microestrutura resultante, pois todas temperaturas de pico foram maiores do que a temperatura de fusão e da temperatura de transformação do aço.

4 | CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da aplicação das equações de soldagem apresentaram resultados discordantes aos obtidos experimentalmente, principalmente em relação ao tempo de resfriamento. Já para a definição da temperatura de pico, apesar da diferença apresentada entre os resultados experimentais e calculados, não afeta adversamente no tipo da microestrutura resultante, porém afeta quantitativamente os constituintes. A diferença nos resultados pode ser dada, pois as equações não levam em consideração algumas diferenças muitas vezes relevantes, como a geometria do metal de base e algumas propriedades físicas do aço a ser soldado, além dos erros oriundos da própria elaboração das equações, que foram deduzidas analiticamente.

REFERÊNCIAS

- ADAMS Jr, C. M. **Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding**. Welding Journal, May, 1958. pp.210s-215s.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding Handbook – Welding Technology**. Miami: AWS, 2001. v. I. Caps 1 e 7. 9th ed.
- ARAÚJO, C. L. D. **A Study of Coarse Grain Heat Affected Zone of Accelerated Cooled Structural Steels**. Cranfield Institute of Technology, PhD Thesis. Cranfield: 1990. pp.19-20.
- KOU, S. **Welding Metallurgy**. New York: John Willey & Sons, 2003. 2ed. p.33.
- MACHADO, I. G., **Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**, Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 200, 119p.
- MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J. **Algumas equações úteis em soldagem. Soldagem e Inspeção** (Impresso), Vol. 19 (1), p. 91-102, 2014.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Capítulo 3. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> Acessado em: 20/12/2013.
- PERDIGÃO, S. C., **Ciclos térmicos de soldagem**, Metalurgia ABM, 38 (295), Jun. 1982, pp.349-353.
- REIS SOBRINHO, J. F., ALCÂNTARA, N. G.; **Influência Dos Parâmetros de Soldagem na Microestrutura da Zona Afetada Termicamente - Zat da Junta Soldada de um Aço de Alta Resistência**, João Pessoa, 2007.

SOBRE A ORGANIZADORA:

Marcia Regina Werner Schneider Abdala: Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-63-5

